

**В.М.КОСЕНКОВ**, канд.техн.наук; **Л.А. КАМЕНСКАЯ**;

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СВАРНОЙ ПЛАСТИНЕ**

У роботі запропоновано спосіб числового розв'язання нестационарної просторової задачі термомпружності. Наведено деякі результати - епюри обчислених за допомогою цього способу полів зварних напружень і деформацій.

The way of the numerical solving of the non-stationary spatial problem of thermo-elastic-plasticity is proposed. Some results is shown, they are the diagrams of fields of welding stresses and deformations, which are calculated using this method.

### **1 Введение**

Сварное соединение характеризуется большой неоднородностью поля напряжений, появляющихся в результате неравномерного нагрева и охлаждения материала свариваемых деталей. Известно, что в процессе сварки наибольшие растягивающие напряжения, по величине близкие к пределу текучести материала, возникают в сварном шве и вблизи него, а в остальной части материала пластин действуют сжимающие напряжения. Такого рода остаточные напряжения приводят к существенному уменьшению несущей способности сварной конструкции, поэтому уменьшение их уровня является важной практической и научной задачей. Неоднородность поля остаточных напряжений вынуждает рассматривать его определение как самостоятельную задачу, предшествующую изучению способов уменьшения уровня напряжений.

Несмотря на то, что основные закономерности полей напряжений и деформаций в сварном соединении пластин описаны в большом количестве работ, детальная информация о распределении этих характеристик во всем объеме изучаемого объекта отсутствует. В то же время, при численном исследовании процесса релаксации остаточных напряжений в сварном соединении под действием импульсной нагрузки, необходимо задавать в качестве начальных условий пространственное распределение напряжений и деформаций в пластине.

Материал сварного соединения находится в трехосном напряженно-деформированном состоянии, и определение этого состояния является пространственной задачей термоупругопластичности. Эта задача характеризуется как нестационарная; ее решение должно удовлетворять состоянию равновесия, в котором находится сварное соединение после сварки.

## 2 Постановка задачи

Поскольку формирование поля остаточных напряжений зависит от многих факторов (режим сварки, масштабный фактор, поле температур в процессе получения сварного соединения и др.) для конкретизации задачи принимали во внимание, что определяемое поле напряжений должно соответствовать экспериментальным данным, в рассматриваемом случае при сварке встык двух стальных (Ст 3) прямоугольных пластин [1] (схема сварного соединения приведена на рис. 1)

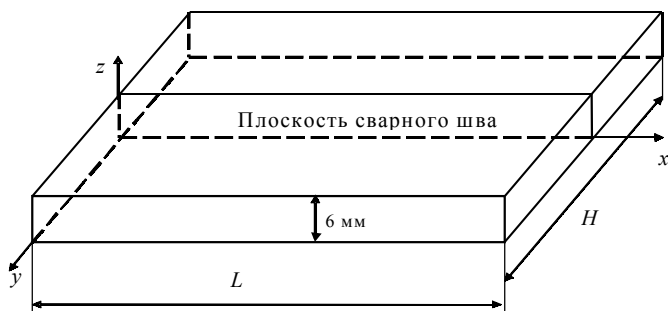


Рисунок 1 – Схема сварного соединения пластин

Существенное влияние на формирование поля остаточных напряжений оказывает поле температур, создаваемое в процессе получения сварного соединения. Наибольшая неравномерность поля температуры наблюдается в поперечном направлении от шва, поэтому в соответствии с экспериментальными данными [2] изменение температуры  $T$  при сварке аппроксимировали функцией от времени  $t$  и одной пространственной координаты  $y$

$$T(y, t) = \begin{cases} T_0 \cdot e^{-y^2/0,00027} \cdot \frac{t}{\tau_T}, & t \in [0, \tau_T]; \\ T_0 \cdot e^{-y^2/0,00027}, & t \in (\tau_T; 1,5 \cdot \tau_T); \\ T_0 \cdot e^{-y^2/0,00027} \cdot \left(2,5 - \frac{t}{\tau_T}\right), & t \in [1,5 \cdot \tau_T, 2,5 \cdot \tau_T]; \\ 0, & t \in [2,5 \cdot \tau_T, \infty), \end{cases}$$

где  $T_0$  – минимальная температура в зоне сварки, при которой, согласно [2], предел текучести материала равен нулю (для Ст 3  $T_0 = 973$  K).

Функция роста и снижения температуры в зависимости от времени, а также параметр  $\tau_T$  выбирались в ходе расчетов. Предел текучести  $\sigma_T^T$  материала, равный нулю при температуре выше  $700^\circ\text{C}$  для большинства конструкционных сталей, на интервале от  $200$  до  $700^\circ\text{C}$  можно считать изменяющимся по параболическому закону [2]

$$\sigma_T = \begin{cases} \sigma_T \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T(y, t)}{T_0} \right)^2 \right], & T(y, t) \in [0, T_0); \\ 0, & T(y, t) \in [T_0, T_{пл}), \end{cases}$$

где  $T_{пл}$  – температура плавления материала;  $\sigma_T$  – предел текучести материала при нормальных условиях (принимали равным 200 МПа).

Нестационарный процесс формирования поля напряжений и деформаций в сварном соединении, подвергнутому неравномерному по объему тепловому воздействию, описывался уравнениями движения сплошной среды. Математическая постановка задачи приведена в работе [3].

Так как источником остаточных напряжений и деформаций является изменение объема материала в результате изменения температуры, для определения остаточных деформаций в сварном соединении использовали дифференциальное соотношение [4], определяющее связь между средним напряжением  $\sigma$  и объемной деформацией  $\epsilon$

$$\dot{\sigma} = -K \cdot \left[ \dot{\epsilon} - 3 \cdot \alpha \cdot \frac{\partial T(y, t)}{\partial t} \right].$$

Здесь  $K$  – модуль объемного сжатия;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала (для стали  $\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Точки над символами обозначают операцию дифференцирования по времени.

Все поверхности сварной пластины считались свободными от внешней нагрузки; соответствующие нормальные и касательные напряжения на них равны нулю. В начальный момент времени напряжения и деформации пластины полагали равными нулю.

Для решения описанной начально-краевой задачи использовался метод конечных объемов с применением способа проведения расчетов «на установление». Его суть состоит в получении решения задачи как предела нестационарного решения, когда процесс формирования поля напряжений и деформаций приходит к стационарному состоянию, если время неограниченно возрастает. Достоинствами этого способа являются возможность использования существующего метода решения нестационарной задачи для получения стационарного решения и простота алгоритма. Относительно большие затраты вычислительного времени в данном случае не играют существенной роли, так как полученное поле остаточных напряжений можно сохранить и многократно использовать в качестве начального условия для последующего решения нестационарных задач.

Благодаря такому приему определение напряженно-деформированного состояния сварного соединения и дальнейшее решение динамических задач при импульсном воздействии на него можно осуществлять с привлечением одних и тех же математической модели и метода ее реализации.

### 3 Результаты численного эксперимента

На рис. 2 и 3 приведены некоторые полученные с помощью описанного выше алгоритма результаты – эпюры продольных остаточных напряжений и пластических деформаций прямоугольного сварного соединения длиной  $L = 300$  мм, толщиной 6 мм.

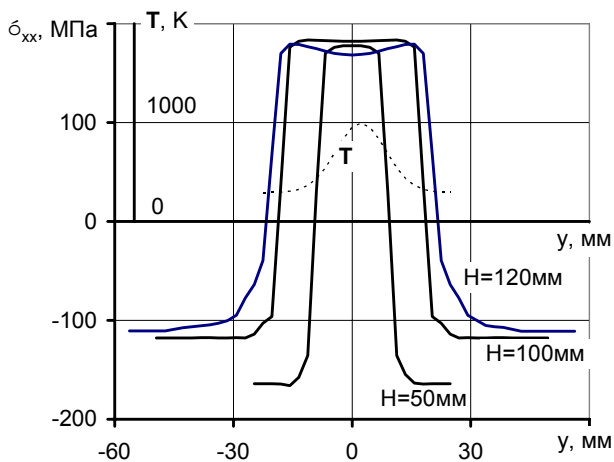


Рисунок 2 – Эпюры остаточных напряжений

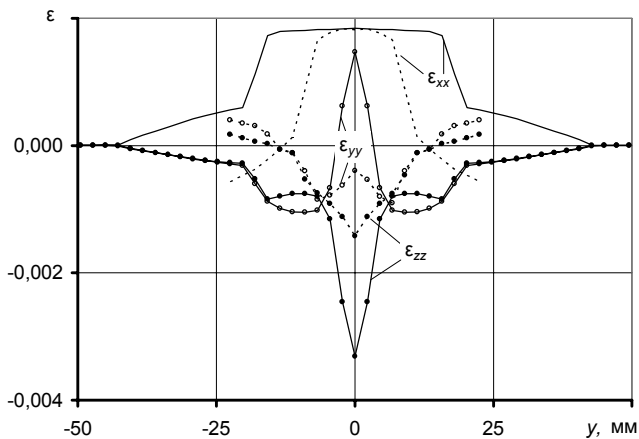


Рисунок 3 – Эпюры пластических деформаций

Ширина пластины  $H$  варьировалась от 50 до 120 мм. Сплошными линиями на рис. 3 показаны соответствующие характеристики для пластины шириной 100 мм, а штриховыми – шириной 50 мм. Эпюры построены для

срединного по длине ( $x = L/2$ ) сечения пластины. Как видно из рисунков, полученное поле остаточных сварочных напряжений согласуется с экспериментальными данными.

#### 4 Выводы

Сравнение эпюр остаточных деформаций (рис. 3) показывает, что уменьшение ширины свариваемых пластин приводит к появлению на внешних границах сварного соединения продольных ( $\epsilon_{xx}$ ) остаточных деформаций противоположного по сравнению с зоной вблизи сварного шва знака, то есть деформаций сжатия. Величины компонент  $\epsilon_{yy}$  и  $\epsilon_{zz}$  при этом имеют существенно меньшие значения. Следовательно, в сварных соединениях, ширина которых сравнима с прогреваемой в процессе сварки до высоких температур околосшовной зоной, уравнивание эпюр остаточных напряжений достигается за счет появления сжимающих осевых остаточных деформаций (распределение температур показано штриховой линией на рис. 2).

**Список литературы:** 1. *Опара В.С., Кудинов В.М., Петушков В.Г.* Роль деформаций изгиба в снижении остаточных сварных напряжений электрогидроимпульсным методом // Автомат. сварка. – 1982. – № 3. С. 20-23. 2. *Винокуров В.А.* Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения. – М.: Машиностроение, 1968. 3. *Барбашова Г.А., Каменская Л.А.* Влияние нагрузки, создаваемой каналом электрического разряда в воде, и гидродинамической нагрузки на напряженно-деформированное состояние сварного соединения // Электронная обработка материалов. – 2007. – № 3. – С. 20-23. 4. *Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Мир, 1975.

*Поступила в редакцию 01.10.2008.*

УДК 621.319.4

**Ю.В.КРАВЧЕНКО**, НТУ «ХПИ», Харьков

#### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРНОЙ СИСТЕМЫ СО СКРУГЛЕННОЙ КРОМКОЙ КРАЯ ОБКЛАДКИ

Проведено розрахунок електричного поля конструкції конденсаторного типу з закругленою кромкою краю обкладки. Зроблено порівняльний аналіз отриманих результатів з даними, що були одержані при розрахунку електричного поля для конденсаторної конструкції з обкладкою, кромка краю якої не закруглена

The calculation of electric field for capacitor type construction with the rounding rim of plate edge is made. The comparative analysis of received results with the obtained data of electric field calculation for capacitor construction with unrounding rim of plate edge is realized.

**Актуальность.** Для высоковольтных импульсных конденсаторов с высокими удельными характеристиками наиболее распространенной причиной